DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.05

УДК 534.2

**А.Ф. Соболев^{1, 2}, Н.Н. Остриков^{1, 2}, А.Н. Аношкин²,
В.В. Пальчиковский², Р.В. Бурдаков², М.С. Ипатов¹,
М.Н. Остроумов¹, М.А. Яковец¹**

¹ Центральный аэрогидродинамический институт
им. профессора Н.Е. Жуковского, Москва, Россия

² Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

СРАВНЕНИЕ ИМПЕДАНСА ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ, ПОЛУЧЕННОГО ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ НА ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ УСТАНОВКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОГО ЧИСЛА МИКРОФОНОВ

Представлены результаты восстановления импеданса и акустического поля в канале для однослойной звукопоглощающей конструкции, геометрические параметры которой были выбраны из условия максимального затухания на частоте в районе 1800 Гц. Измерения для одного и того же образца проводились на двух установках: в Центральном аэрогидродинамическом институте и в Центре акустических исследований Пермского национального исследовательского политехнического университета. Измерения проводились при отсутствии потока. Для восстановления импеданса использовался вариант метода Прони, когда постоянные распространения в канале, соответствующие модам, распространяющимся в прямом и обратном направлении, определяются с помощью четырех микрофонов, расположенных на жесткой стенке на одинаковом расстоянии в зоне образца, не слишком близко к переднему краю – четырехмикрофонный метод определения импеданса. Показано, что результаты восстановления импеданса по измерениям на двух установках достаточно хорошо соответствуют друг другу.

Ключевые слова: уровень звукового давления, импеданс, прямая и обратная моды, микрофон, волновое уравнение, граничное условие.

**A.F. Sobolev^{1, 2}, N.N. Ostrikov^{1, 2}, A.N. Anoshkin²,
V.V. Palchikovskiy², R.V. Burdakov², M.S. Ipatov¹,
M.N. Ostroumov¹, M.A. Yakovets¹**

¹ Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

COMPARISON OF LINER IMPEDANCE DERIVED FROM THE RESULTS OF MEASUREMENTS AT TWO DIFFERENT SETUPS USING A SMALL NUMBER OF MICROPHONES

Results of the recovery of the impedance and acoustic field in the duct for a single-layer liner, the geometric parameters of which have been chosen from the condition of maximum attenuation at

a frequency of 1800 Hz are proposed. Measurements of the same sample were carried out on two set-ups in Central Aerohydrodynamic Institute and in Acoustic Research Center of Perm National Research Polytechnic University. Measurements were made without flow. To restore the impedance it was used variant of Prony, when the propagation constants in the duct corresponding to the modes propagating in the forward and backward direction, are determined using four microphones. The microphones are placed on a rigid wall at equal distance in the area of the sample, not too close to the front edge. It is shown that results of the impedance recovery based on measurements carried out on two different set-ups are fairly well matched.

Keywords: sound pressure level, impedance, forward and backward modes, microphone, wave equation, boundary condition.

Введение

Звукопоглощающие конструкции (ЗПК) являются наиболее эффективным средством снижения шума вентилятора авиадвигателя – доминирующего источника в шуме современных самолетов на режимах взлета и набора высоты при проведении сертификации по шуму на местности. Основопологающей характеристикой ЗПК является ее импеданс – комплексная величина, которая зависит от геометрических параметров ЗПК и от специфических внешних условий эксплуатации. В первую очередь это высокий уровень звукового давления, частотный спектр основного источника звука – вентилятора, а также поток и пограничный слой. В настоящее время наиболее распространенными являются одно-, двух- и трехслойные конструкции резонансного типа, состоящие из набора перфорированных или микропористых тонких листов, разделенных слоями сотоблоков. Особенностью конструкций данного типа является сильно выраженная нелинейная зависимость импеданса от уровня звукового давления на поверхности ЗПК. Основным инструментом, позволяющим экспериментально исследовать импеданс конструкций резонансного типа при различных значениях уровня звукового давления, является классический интерферометр, в котором звук падает на образец по нормали. Импеданс определяется на основании измерения поля в трубе интерферометра с помощью двух микрофонов, расположенных на стенке трубы [1]. Частотный диапазон определения импеданса можно расширить, если использовать для определения импеданса увеличенное число микрофонов [2, 3].

В настоящее время на основании обобщения многочисленных теоретических и экспериментальных исследований разработаны полуэмпирические формулы для расчета импеданса однослойных сотовых ЗПК в зависимости от геометрических параметров, уровня звукового давления и скорости потока [4, 5]. Эти формулы позволяют в какой-то

мере определять влияние скорости потока и пограничного слоя на импеданс. Однако вопрос, насколько правильно определяется это влияние, этот остается открытым. Есть все основания утверждать, что, основанные на упрощенных предпосылках относительно скорости потока, эти формулы в условиях, когда скорости потока в проточных частях современных авиационных двигателей сильно возросли на всех режимах, уже не могут достаточно адекватно описывать влияние скорости потока и пограничного слоя на импеданс.

Для специального исследования главенствующих факторов, влияющих на импеданс ЗПК, используемых в каналах авиационных двигателей, скорости и параметров пограничного слоя потока, распространяющегося вдоль обшивки, а также уровня звукового давления, у нас в стране и за рубежом созданы экспериментальные установки. В России имеются две такие установки – одна в Центре акустических исследований (ЦАИ) Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), другая в НИО-9 Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ). За рубежом такие установки созданы в основных крупных научных центрах США и Европы, занимающихся вопросами снижения авиационного шума. Структура и принцип работы всех установок одинаков. Каждая такая установка имеет достаточно длинную узкую трубу с рабочей частью прямоугольного сечения. На одной стороне рабочей части устанавливается протяженный образец. Звук в трубе создается с помощью акустических драйверов, расположенных на конце(ах) трубы. Для создания потока в трубе могут использоваться вентиляторы. Поперечный размер трубы выбирается из условия обеспечения одномодового распространения в рабочей части. Использование трубы прямоугольного сечения продиктовано исключительно простотой изготовления образца. Акустическое поле в рабочей части регистрируется с помощью микрофонов, расположенных на стенках.

В настоящее время развиваются два способа извлечения импеданса по результатам измерения поля в трубе – прямой и обратный. При прямом способе решается аналитически или с использованием численных методов прямая задача распространения звука с заданными граничными условиями. В этом случае необходимо задать подходящим образом выбранную целевую функцию. Импеданс определяется в процессе последовательных итераций, приводящих целевую функцию

к экстремальному значению. По полученному в результате итераций импедансу восстанавливается звуковое поле. Это поле в точках расположения микрофонов сравнивается с экспериментальными данными. При обратном способе решается обратная задача, а именно: по результатам измерения поля в трубе сначала определяются пространственные волновые числа в прямом и обратном направлении распространения звуковой волны. Далее полученные значения для волновых чисел подставляются в граничное условие, и импеданс определяется сразу без использования целевой функции и проведения итерационной процедуры. По полученному импедансу восстанавливается звуковое поле в трубе, которое в точках расположения микрофонов сравнивается с экспериментальными данными. Прямой и обратный способы имеют недостатки. Прямой способ требует больших затрат по времени и больших вычислительных ресурсов. Обратный способ при минимальных затратах по времени расчета требует проведения дополнительного исследования полученного решения для волновых чисел с целью исключения ложных решений. Существует два варианта обратного способа определения импеданса – это восстановление импеданса с использованием метода Прони [6] и восстановление импеданса с использованием передаточных коэффициентов [7].

Анализ зарубежных публикаций [8–25] показывает, что, несмотря на проведенные многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, достаточно надежной методики по извлечению импеданса по результатам измерений звукового поля еще не создано. Все предлагаемые методы определения импеданса находятся в стадии тестирования. В частности, проводится сравнение результатов восстановления по разным методам импеданса типичной однослойной конструкции, геометрические параметры которой выбираются таким образом, чтобы основная частота резонанса была существенно ниже частоты возбуждения первой поперечной моды в трубе, а частота антирезонанса была выше этой частоты. Вместе с тем значительный интерес представляет восстановление импеданса конструкций, геометрические параметры которых выбираются из условия максимального затухания в канале на заданной частоте, поскольку именно из таких условий выбираются геометрические параметры ЗПК в реальных каналах.

В данной работе представлены результаты восстановления импеданса и акустического поля в канале для однослойной конструкции,

геометрические параметры которой были выбраны из условия максимального затухания на частоте в районе 1800 Гц. Измерения для одного и того же образца проводились на двух установках – в ЦАГИ и в ЦАИ ПНИПУ. Измерения проводились при отсутствии потока. Для восстановления импеданса использовался вариант метода Прони, когда постоянные распространения определяются с помощью четырех микрофонов, расположенных в зоне образца не слишком близко к переднему краю – четырехмикрофонный метод определения импеданса [26].

Определение импеданса по результатам измерения акустического поля с помощью четырех микрофонов

В случае гармонической зависимости от времени ($P = p \exp(-i\omega t)$) уравнение распространения звука в канале с однородным потоком имеет вид

$$\nabla^2 P - \left(-ik + M \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 P = 0, \quad (1)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; $k = \omega/c$; M – локальное число Маха потока,

$M = v/c$. Граничное условие на поверхности образца должно удовлетворять условию следующего вида:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial y} \right|_{y=H} = ik\beta \left(1 - \frac{M}{ik} \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 P \Big|_{y=H}, \quad (2)$$

где β – удельный безразмерный адмитанс ЗПК (величина обратная импедансу), $\beta = 1/Z$. Граничное условие на жесткой стенке соответствует $\beta = 0$ в уравнении (2).

В случае одномодового распространения в канале решение уравнения (1), удовлетворяющее граничным условиям (2), имеет следующий вид, соответствующий сумме прямых и отраженных мод:

$$P(x, y) = A \cos(\chi^+ y) \exp(i\xi^+ x) + B \cos(\chi^- y) \exp(i\xi^- x), \quad (3)$$

где A и B – неизвестные коэффициенты – амплитуды мод; $\xi^\pm$ и $\chi^\pm$ – волновые числа, соответствующие распространению волн в положительном и отрицательном направлении осей x и y .

После подстановки выражения (3) в граничные условия (2) получается система из двух уравнений, из которых одно трансцендентное, для определения пространственных волновых чисел:

$$\chi^{\pm} \operatorname{tg}(\chi^{\pm} H) = -ik\beta \left(1 - M \frac{\xi^{\pm}}{k}\right)^2, \quad (4)$$

$$\xi^{\pm} = \frac{-M \pm \sqrt{k^2 - \chi^{\pm 2} (1 - M^2)}}{1 - M^2}. \quad (5)$$

Трансцендентное уравнение (4) имеет бесконечное количество комплексных корней. При известном адмитансе β это уравнение может быть решено численно. Решение прямой задачи определения акустического поля в канале в виде разложения по модам (3) может быть получено в замкнутом виде, если известны дополнительные условия на входе в канал и выходе из него, на основании которых определяются неизвестные коэффициенты A и B . Следует заметить, что решение конвективного волнового уравнения в виде (3) справедливо и для жестких участков канала, для которых следует считать, что $\beta = 0$. Из уравнений (3)–(5) следует, что для определения адмитанса β и его обратной величины импеданса Z необходимо определить четыре неизвестные величины: A , B , ξ^+ и ξ^- . Очевидно, что для этого следует измерить поле в четырех точках. В работе [26] предложен способ определения постоянных распространения ξ^+ и ξ^- через данные измерений, который дает результат, совпадающий в случае четырех микрофонов с результатом, полученным по методу Прони:

$$\xi_0^+ d = -i \ln(a) \pm 2\pi n, n = 0, 1, \dots, \quad (6)$$

$$\xi_0^- d = -i \ln(b) \pm 2\pi n, n = 0, 1, \dots, \quad (7)$$

где d – расстояние между микрофонами; $a = q/2 + \sqrt{q^2/4 - r}$,

$$b = q/2 - \sqrt{q^2/4 - r}, \quad q = \frac{H_{1,2}H_{1,3} - H_{1,4}}{H_{1,2}^2 - H_{1,3}^2}, \quad r = \frac{H_{1,3}^2 - H_{1,2}H_{1,4}}{H_{1,2}^2 - H_{1,3}^2}. \quad \text{Здесь}$$

$H_{1,k} = P_k/P_1$, $k = 2, 3, 4$; P_k – измеренное давление, записанное в комплексном виде.

Из формул (6) и (7) видно, что собственные значения в осевом направлении определяются неоднозначно. Дополнительными критериями, позволяющими выбрать единственно правильные решения, являются требования затухания мод в направлении своего распространения и условие непрерывности в зависимости от частоты.

По собственным значениям в осевом направлении определяются собственные значения в поперечном направлении

$$\chi_0^{\pm} = \sqrt{\left(k - M\xi_0^{\pm}\right)^2 - \xi_0^{\pm 2}},$$

и далее определяется адмитанс

$$\beta^{\pm} = i \frac{\chi_0^{\pm}}{k} \operatorname{tg}(\chi_0^{\pm} H) / \left(1 - M \frac{\xi_0^{\pm}}{k}\right)^2,$$

где $Z^{\pm} = 1/\beta^{\pm}$. Очевидно, что при правильном извлечении адмитанса должно соблюдаться равенство $Z^{+} = Z^{-}$.

Экспериментальные установки и объект исследования

Сравнительные испытания для одинаковых образцов ЗПК проводились на установках ЦАГИ и ЦАИ ПНИПУ. Внешний вид установки ЦАГИ показан на рис. 1. Рабочая часть установки представляет собой достаточно длинный канал прямоугольного поперечного сечения 40×40 мм, состоящий из трех секций. Стенки канала в первой и третьей секции – жесткие. На боковой стенке второй (средней) секции предусмотрена полость, в которую устанавливается испытуемый образец заподлицо с внутренней стенкой канала. Длина образца равна 400 мм, ширина 52 мм, максимальная толщина образца может быть порядка 90 мм. Выбранные поперечные размеры канала и длина облицовки автоматически задают диапазон частот от 500 Гц до 4 кГц, в котором можно правильно восстановить импеданс на основе одномодового приближения.

Акустическое поле в трубе возбуждается с помощью акустических излучателей, установленных в начале и конце рабочей части. Воздушный поток создается с помощью бытового вентилятора, установленного в конце рабочей части. Акустическое поле в рабочей части оп-

ределяется с помощью девяти микрофонов, установленных во всех трех частях. Более подробное описание установки ЦАГИ можно найти в работе [27]. Для уменьшения шума в окружающем пространстве на входе и выходе трубы установлены глушители, которые дополнительно снижают уровень звукового давления волны, отражаемой обратно в рабочую часть.

Рис. 1. Внешний вид установки «Канал с потоком» ЦАГИ

На рис. 2 показаны большая (сечение канала 100×150 мм) и малая (сечение канала 40×40 мм) установки «Канал с потоком» ЦАИ ПНИПУ. Представленные в статье результаты были получены на малой установке, где внутренние поперечные размеры рабочей части и допустимые геометрические размеры образцов приблизительно такие же, как на установке ЦАГИ. Источником звука также являются акустические излучатели. Источник воздушного потока – специально изготовленная компрессорная установка. В начале и в конце канала предусмотрены глушители, которые должны максимально снижать уровень звукового давления волны, отражаемой обратно в рабочую часть. Для измерения звукового поля предусмотрено порядка 70 микрофонов, устанавливаемых заподлицо с внутренней поверхностью трубы на боковой стенке.

Геометрические параметры образца выбирались из условия оптимального затухания на частоте 1800 Гц при отсутствии потока. Поскольку канал в рассматриваемом диапазоне частот предполагает одномодовое распространение и он достаточно длинный, то условие оптимизации затухания совпадает с условием слияния первой и второй мод. С математической точки зрения это соответствует слиянию двух корней характеристического уравнения (4) и образованию двойного

корня. С физической точки зрения происходит перекачка части энергии из энергонесущей первой моды во вторую моду. При этом образовавшаяся двойная мода затухает сильнее, чем первая. В тех случаях, когда условия слияния мод точно не соблюдаются, а они не соблюдаются практически всегда, вблизи оптимальных условий независимо существуют эти две моды. Если они достаточно близки, невозможно определить без специального исследования, какая из них первая и какая вторая. Наличие двух близких мод на выбранных частотах оптимизации приводит к усложненной интерференционной картине на этих частотах. В результате могут возникать трудности при восстановлении амплитудных и, главным образом, фазовых характеристик поля по результатам измерений при учете только одномодового распространения.

Рис. 2. Большая и малая установки «Канал с потоком» ЦАИ ПНИПУ

Условие образования двойной моды имеет следующий вид [28]:

$$\frac{\chi H}{\cos^2(\chi H)} + \operatorname{tg}(\chi H) \left(1 - \frac{2Mv^2}{(1 - \mu M) \sqrt{1 - v^2(1 - M^2)}} \right) = 0, \quad (8)$$

где χ – корни характеристического уравнения $\mu = \xi/k$; $\nu = \chi/k$; H – высота канала. Соответствующее значение оптимального импеданса получается из характеристического уравнения (4):

$$Z = \frac{(1 - \mu M)^2}{i\nu \operatorname{tg}(\chi H)}. \quad (9)$$

Геометрические параметры образца (толщина перфорированного листа, диаметр и процент перфорации отверстий, глубина воздушной полости) однослойной конструкции были выбраны таким образом, чтобы на частоте 1800 Гц ее фактический импеданс совпадал с оптимальным значением, определяемым по формулам (8), (9). Для этого были использованы полуэмпирические зависимости, связывающие импеданс конструкции с ее геометрическими параметрами из работы [4].

Звукопоглощающий образец, удовлетворяющий принципу оптимального затухания, был изготовлен в ПНИПУ с использованием 3D-технологии. На рис. 3 представлена фотография испытуемого образца. Данная технология позволяет создать однородную конструкцию с одинаковыми и ровными отверстиями без закруглений кромок. Следует отметить, что конструкция была изготовлена таким образом, что на каждую ячейку сотовой структуры приходится только одно отверстие перфорированной пластины. Это позволяет более точно контролировать импеданс конструкции.

Рис. 3. Испытуемый образец

Результаты исследований

Измерения проводились на дискретных частотах в диапазоне от 500 до 3150 Гц. В качестве опорного сигнала был выбран сигнал на микрофоне, расположенном в жесткостенной части канала в начале рабочей области. Уровень звукового давления на опорном микрофоне был равен 135 дБ. Критерием правильности восстановленного импеданса является достаточная близость амплитуды и фазы восстановленного поля к амплитуде и фазе звукового сигнала на измерительных

микрофонах. Уровень и фаза звукового давления на стенке рабочей части определялся в девяти точках в случае установки ЦАГИ и в 71 точке в случае установки ЦАИ.

Для оценки влияния выходного глушителя на акустическое поле в зоне расположения образца был проведен расчет коэффициента отражения в жесткостенной части канала за образцом по результатам измерений поля в этой части канала. Результаты расчета представлены на рис. 4. Из сравнения видно, что на всех частотах, за исключением частоты 500 Гц, коэффициент отражения на установке ЦАГИ выше, чем на установке ЦАИ. В связи с этим следует заметить, что при проектировании установки в ЦАГИ не ставилась задача добиться полностью заглушенного окончания канала, поскольку считалось, что влияние отражения можно учесть при обработке результатов измерений, и теоретические расчеты с использованием виртуальной установки это подтвердили.

Рис. 4. Коэффициенты отражения в жесткостенной части канала: сплошная линия – установка ЦАГИ; пунктирная линия – установка ЦАИ

В таблице представлены действительная и мнимая части безразмерного осевого волнового числа на исследуемых частотах, полученные по результатам измерений на установках ЦАГИ и ЦАИ. Из таблицы видно, что в целом соответствие данных, полученных с установок, достаточно хорошее. Наибольшее расхождение в значениях для осевых волновых чисел наблюдается на частотах вблизи 1800 Гц. Это, по-видимому, связано с особенностями структуры поля на этой частоте.

Значения осевых волновых чисел на разных частотах

Уста- новка	Осевые волновые числа	f , Гц											
		500	630	800	1000	1250	1500	1600	1800	2000	2500	3000	3150
ЦАГИ	Re(μ)	1,33	1,32	1,32	1,36	1,51	1,73	1,97	0,67	0,13	0,78	0,87	0,90
	Im(μ)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,08	0,14	1,66	0,46	0,03	0,01	0,01
ЦАИ	Re(μ)	1,30	1,32	1,41	1,40	1,52	1,80	2,05	0,19	0,12	0,75	0,88	0,90
	Im(μ)	0,06	0,02	0,01	0,01	0,03	0,08	0,13	1,23	0,46	0,01	0,01	0,00

На рис. 5 и 6 представлены частотные зависимости соответственно для действительной и мнимой части импеданса, полученного после восстановления по результатам измерений на установках ЦАГИ и ЦАИ, а также частотные зависимости действительной и мнимой частей оптимального импеданса. Из рисунков видно заметное расхождение действительных частей импеданса на частоте 1800 Гц, также на низкой частоте 500 Гц и достаточно хорошее согласование мнимых частей импеданса во всей области частот. Из сравнения полученных результатов для действительной части импеданса с результатами для осевого волнового числа (таблица) видно, что на частоте 500 Гц осевое волновое число слабо зависит от действительной части импеданса. Сильно различающимися значениям для действительной части импеданса соответствуют практически одинаковые значения для осевого волнового числа. Это связано с тем, что ошибки определения импеданса на этой частоте (вдали от области резонанса) сильно возросли, поскольку сильно увеличился импеданс за счет мнимой части. На этой частоте $\text{Im}(Z) = -4$. Самые грубые оценки показывают, что при больших Z ошибки определения импеданса пропорциональны квадрату самого импеданса: $\Delta Z \approx Z_0^2 (i-1)(\xi - \xi_0)$. Таким образом, малые отклонения в волновом числе ξ вызывают заметные отклонения в импедансе.

Из рис. 5 и 6 также видно, что на частоте 1800 Гц расчетный импеданс наиболее близок к оптимальному импедансу одновременно по действительной и мнимой частям. Следовательно, и затухание звука в канале, создаваемое данным образцом, будет максимальным на этой частоте или вблизи нее.

Рис. 5. Сравнение действительной части импеданса с оптимальным значением: — $\diamond$ — $\text{Re}(Z)$ ЦАГИ; — $\triangle$ — $\text{Re}(Z)$ ЦАИ; — $*$ — $\text{Re}(Z_{\text{opt}})$

Рис. 6. Сравнение мнимой части импеданса с оптимальным значением: — $\diamond$ — $\text{Im}(Z)$ ЦАГИ; — $\triangle$ — $\text{Im}(Z)$ ЦАИ; — $*$ — $\text{Im}(Z_{\text{opt}})$

Обратное восстановление поля по восстановленному импедансу было проведено для обеих установок на всех измеренных частотах. В исследовании наибольший интерес представлял диапазон частот, включающий частоту настройки 1800 Гц. В связи с этим более подробно рассмотрены три частоты: 1600, 1800 и 2000 Гц, хотя достаточно хорошее восстановление поля было получено на всех частотах для обеих установок.

На рис. 7–12 представлено сравнение восстановленных распределения уровня и фазы звукового давления вдоль рабочей части (кривые) с экспериментальными значениями (символы) на частотах 1600, 1800 и 2000 Гц. Графики на рисунках, *а* соответствуют результатам восстановления по данным ЦАГИ, графики *б* соответствует результатам восстановления по данным ЦАИ. Из сравнения видно достаточно хорошее соответствие восстановленных и экспериментальных данных на частотах 1600 и 2000 Гц для обеих установок. В то же время наблюдается некоторое расхождение с экспериментом фазовых характеристик на частоте 1800 Гц.

Рис. 7. Распределение уровня звукового давления на частоте 1600 Гц:
а – установка в ЦАГИ; *б* – установка в ЦАИ

Рис. 8. Распределение фазы звукового давления на частоте 1600 Гц:
а – установка в ЦАГИ; *б* – установка в ЦАИ

Рис. 9. Распределение уровня звукового давления на частоте 1800 Гц:
a – установка в ЦАГИ; *б* – установка в ЦАИ

Рис. 10. Распределение фазы звукового давления на частоте 1800 Гц:
a – установка в ЦАГИ; *б* – установка в ЦАИ

Рис. 11. Распределение уровня звукового давления на частоте 2000 Гц:
a – установка в ЦАГИ; *б* – установка в ЦАИ

Рис. 12. Распределение фазы звукового давления на частоте 2000 Гц:
 а – установка в ЦАГИ; б – установка в ЦАИ

Из представленных рисунков видно, что на частоте 1600 Гц данные восстановления уровня звукового давления и фазы согласуются качественно и количественно. На частоте 1800 Гц данные восстановления уровня звукового давления качественно согласуются по всей длине образца, однако есть количественные расхождения в конце образца. Данные восстановления фазовых характеристик заметно отличаются по всей длине образца. На частоте 2000 Гц данные восстановления уровня звукового давления и фазы качественно согласуются по всей длине образца. Расхождение по уровню звукового давления связано с небольшим различием уровня звукового давления перед образцом в экспериментах ЦАГИ и ЦАИ. Расхождение восстановленных полей по амплитуде и фазе на частоте 1800 Гц вызвано неодинаковым поведением двух близко расположенных мод, соответствующих оптимальному импедансу. По-видимому, эти две моды на двух установках возбуждаются по-разному. Однако этот вопрос требует специального рассмотрения.

Распределение уровня звукового давления в рабочей части в зоне образца на частоте 1800 Гц, когда две моды близки, принципиально отличается от распределения уровня звукового давления на других частотах, когда эти моды сильно разошлись и мы фактически имеем одномодовое распространение. На рис. 13 представлены распределения уровней звукового давления для мод, распространяющихся в прямом и обратном направлении и их сумма на частотах 1800 Гц (рис. 13, а) и 1600 Гц (рис. 13, б). Сплошной кривой обозначена мода, распространяющаяся в прямом направлении, штриховой линией – мода, распрост-

Рис. 13. Распределение уровня звукового давления вдоль образца:
 а – частота 1800 Гц; б – частота 1600 Гц

раняющаяся в обратном направлении, кружочками – их сумма. Из рис. 13, а (измерения в ЦАИ) видно, что на втором конце образца генерируется мода, уровень звукового давления которой, конечно, значительно меньше, чем уровень звукового давления прямой моды в начале образца, но он значительно выше (на 80 дБ), чем уровень звукового давления прямой моды в конце образца. Уровни звукового давления этих мод сравниваются на расстоянии $0,7L$, где L – длина образца. Суммарный уровень звукового давления определяется уровнем звукового давления прямой моды в передней части зоны образца и уровнем звукового давления обратной моды в задней части зоны образца. На остальных частотах (см. рис. 13, б) уровень звукового давления обратной моды на втором конце образца равен или меньше уровня звукового давления прямой моды на втором конце. Точно такие же результаты были получены по измерениям на установке ЦАГИ.

Заключение

Проведенные на двух установках экспериментальные исследования показали, что предложенный способ извлечения импеданса с помощью четырехмикрофонного метода позволяет восстановить импеданс звукопоглощающих конструкций, обладающих большим затуханием на некоторых частотах или в диапазоне частот. Некоторое расхождение восстановленных уровня звукового давления и фазы с экспериментальными данными в области частот, на которых может

произойти сближение мод, требует дополнительного специального рассмотрения. Важно оценить ошибки восстановления импеданса и акустического поля, связанные с используемым методом.

Данный метод определения импеданса, как впрочем и все другие нам известные, позволяет восстановить средний по площади конструкции импеданс, соответствующий некоторому среднему уровню звукового давления. Фактический импеданс будет переменным по площади вследствие изменения уровня звукового давления из-за затухания и взаимодействия прямой и обратной мод. Этот фактор необходимо учитывать.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ по договору № 14.Z50.31.0032.

Библиографический список

1. ASTM E1050-08. Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system / ASTM International, 2008. – URL: <http://www.astm.org/Standarts/E1050.htm> (дата обращения: 15.03.2016).
2. Schultz T., Cattafesta L., Sheplak M. Comparison of the two-microphone method and a modal decomposition method for acoustic impedance testing // AIAA. – 2006. – Paper 2006–2695.
3. Ипатов М.С., Остроумов М.Н., Соболев А.Ф. Определение импеданса образцов ЗПК на интерферометре при нормальном падении звука в расширенной области частот // Тр. первой Всерос. конф. по акустике. 6–9 октября 2014 г. – М., 2014.
4. Соболев А.Ф. Полуэмпирическая теория однослойных сотовых звукопоглощающих конструкций с лицевой перфорированной панелью // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53, № 6. – С. 861–872.
5. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data // AIAA. – 2008. – Paper 2008–2930.
6. Comparative study of impedance eduction methods. Part 2: NASA tests and methodology / M.G. Jones, W.R. Watson, B.M. Hower-ton, S. Busse-Gerstengarb // AIAA. – 2013. – Paper 2013–2125.

7. Abom M. Measurement of the scattering-matrix of acoustical two-ports // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 1991. – Vol. 5, № 2. – P. 89–104.

8. Watson W.R., Jones M.G., Parrott T.L. Validation of an impedance eduction method in flow // *AIAA Journal*. – 1999. – Vol. 37, № 7. – P. 818–824.

9. Impedance eduction in the presence of shear flow / W.R. Watson, M.B. Tracy, M.G. Jones, T.L. Parrott // *AIAA*. – 2001. – Paper 2001–2263.

10. Watson W.R., Tanner S.E., Parrott T.L. Optimization method for educing variable-impedance liner properties // *AIAA Journal*. – 1998. – Vol. 36, № 1. – P. 18–23.

11. Jones M.G., Parrott T.L., Watson W.R. Comparison of acoustic impedance eduction techniques for locally-reacting liners // *AIAA*. – 2003. – Paper 2003–3306.

12. Comparison of two waveguide methods for educing liner impedance in grazing flow / M.G. Jones, W.R. Watson, M.B. Tracy, T.L. Parrott // *AIAA Journal*. – 2004. – Vol. 42, № 2. – P. 232–240.

13. Jones M.G., Watson W.R., Parrott T.L. Design and evaluation of modifications to the NASA Langley flow impedance tube // *AIAA*. – 2004. – Paper 2004–2837.

14. Gallman J.M., Kunze R.K. Grazing flow acoustic impedance testing for the NASA AST Program // *AIAA*. – 2002. – Paper 2002–2447.

15. Elnady T., Bodén H. On semi-empirical liner impedance modeling with grazing flow // *AIAA*. – 2003. – Paper 2003–3304.

16. Elnady T., Boden H., Elhadidi B. Validation of an inverse semi-analytical technique to educe liner impedance // *AIAA Journal*. – 2004. – Vol. 47, № 12. – P. 2386–2844.

17. Development and qualification of an in-situ grazing flow impedance measurement facility / J.C. Simonich, B.L. Morin, S. Narayanan, W.P. Patrick // *AIAA*. – 2006. – Paper 2006–2640.

18. Validation of an inverse analytical technique to educe liner impedance with grazing flow / T. Elnady, M. Musharraf, H. Boden, B. Elhadidi // *AIAA*. – 2006. – Paper 2006–2639.

19. Jing X., Peng S., Sun X. A straightforward method for wall impedance eduction in a flow duct // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2008. – Vol. 124, № 1. – P. 227–234.

20. Watson W.R., Jones M.G. Impedance reduction in ducts with higher-order modes and flow // AIAA. – 2009. – Paper 2009–3236.

21. Jones M.G., Watson W.R., Nark D.M. Effects of flow profile on reduced acoustic liner impedance // AIAA. – 2010. – Paper 2010–3763.

22. Piot E., Primusy J., Simonz F. Liner impedance reduction technique based on velocity fields // AIAA. – 2012. – Paper 2012–2198.

23. Determination of the impedance for lined ducts with grazing flow / L. Enghardt, A. Fischery, A. Schulzz, S. Busse-Gerstengarbex // AIAA. – 2012. – Paper 2012–2243.

24. Zhou L., Bodén H. A systematic uncertainty analysis for liner impedance reduction technology // Journal of Sound and Vibration. – 2015. – Vol. 356. – P. 86–99.

25. Schulze M., Sattelmayer T. Frequency domain simulations for the determination of liner effects on longitudinal wave propagation // Aeroacoustics. – 2015. – Vol. 14, № 7. – P. 1025–1047.

26. Соболев А.Ф. Определение импеданса образцов ЗПК на установке «Интерферометр с потоком» // Тр. первой Всерос. конф. по акустике. 6–9 октября 2014 г. – М., 2014.

27. Соболев А.Ф., Ипатов М.С., Остроумов М.Н. Исследования по созданию экспериментальной установки «Интерферометр с потоком» // Материалы третьей открытой Всерос. конф. по аэроакустике. 30 сентября – 04 октября 2013 г. – М., 2013. – С. 81–83.

28. Соболев А.Ф. Повышение эффективности снижения шума в канале с потоком при наличии звукопоглощающих облицовок // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45, № 3. – С. 404–413.

References

1. ASTM E1050-08. Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system. ASTM International, 2008, available at: <http://www.astm.org/Standards/E1050.htm> (accessed 15 March 2016).

2. Schultz T., Cattafesta L., Sheplak M. Comparison of the two-microphone method and a modal decomposition method for acoustic impedance testing. AIAA, 2006, Paper 2006-2695.

3. Ipatov M.S., Ostroumov M.N., Sobolev A.F. Determination of impedance of liner samples on the interferometer at normal incidence of sound

in the expanded frequency region. *Trudy pervoy Vserossiyskoy konferentsii po akustike*. Moscow, 06-09 October 2014.

4. Sobolev A.F. A semiempirical theory of a one-layer cellular sound-absorbing lining with a perforated face panel. *Acoustical Physics*, 2007, vol. 53, no. 6, pp. 762-771.

5. Yu J., Ruiz M., Kwan H.W. Validation of Goodrich perforate liner impedance model using NASA Langley test data. *AIAA*, 2008, Paper 2008-2930.

6. Jones M.G., Watson W.R., Howerton B.M., Busse-Gerstengarb S. Comparative study of impedance eduction methods. Part 2. NASA tests and methodology. *AIAA*, 2013, Paper 2013-2125.

7. Abom M. Measurement of the scattering-matrix of acoustical two-ports. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1991, vol. 5, no. 2, pp. 89-104.

8. Watson W.R., Jones M.G., Parrott T.L. Validation of an impedance eduction method in flow. *AIAA Journal*, 1999, vol. 37, no. 7, pp. 818-824.

9. Watson W.R., Tracy M.B., Jones M.G., Parrott T.L. Impedance eduction in the presence of shear flow. *AIAA*, 2001, Paper 2001-2263.

10. Watson W.R., Tanner S.E., Parrott T.L. Optimization method for educing variable-impedance liner properties. *AIAA Journal*, 1998, vol. 36, no. 1, pp. 18-23.

11. Jones M.G., Parrott T.L., Watson W.R. Comparison of acoustic impedance eduction techniques for locally-reacting liners. *AIAA*, 2003, Paper 2003-3306.

12. Jones M.G., Watson W.R., Tracy M.B., Parrott T.L. Comparison of two waveguide methods for educing liner impedance in grazing flow. *AIAA Journal*, 2004, vol. 42, no. 2, pp. 232-240.

13. Jones M.G., Watson W.R., Parrott T.L. Design and evaluation of modifications to the NASA Langley flow impedance tube. *AIAA*, 2004, Paper 2004-2837.

14. Gallman J.M., Kunze R.K. Grazing flow acoustic impedance testing for the NASA AST Program. *AIAA*, 2002, Paper 2002-2447.

15. Elnady T., Bodén H. On semi-empirical liner impedance modeling with grazing flow. *AIAA*, 2003, Paper 2003-3304.

16. Elnady T., Boden H., Elhadidi B. Validation of an inverse semi-analytical technique to educe liner impedance. *AIAA Journal*, 2004, vol. 47, no. 12, pp. 2386-2844.

17. Simonich J.C., Morin B.L., Narayanan S., Patrick W.P. Development and qualification of an in-situ grazing flow impedance measurement facility. *AIAA*, 2006, Paper 2006-2640.

18. Elnady T., Musharraf M., Boden H., Elhadidi B. Validation of an inverse analytical technique to deduce liner impedance with grazing flow. *AIAA*, 2006, Paper 2006-2639.

19. Jing X., Peng S., Sun X. A straightforward method for wall impedance deduction in a flow duct. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, vol. 124, no. 1, pp. 227-234.

20. Watson W.R., Jones M.G. Impedance deduction in ducts with higher-order modes and flow. *AIAA*, 2009, Paper 2009-3236.

21. Jones M.G., Watson W.R., Nark D.M. Effects of flow profile on deduced acoustic liner impedance. *AIAA*, 2010, Paper 2010-3763.

22. Piot E., Primusy J., Simonz F. Liner impedance deduction technique based on velocity fields. *AIAA*, 2012, Paper 2012-2198.

23. Enghardt L., Fischery A., Schulzz A., Busse-Gerstengarbex S. Determination of the impedance for lined ducts with grazing flow. *AIAA*, 2012, Paper 2012-2243.

24. Zhou L., Bodén H. A systematic uncertainty analysis for liner impedance deduction technology. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, vol. 356, pp. 86-99.

25. Schulze M., Sattelmayer T. Frequency domain simulations for the determination of liner effects on longitudinal wave propagation. *Aeroacoustics*, 2015, vol. 14, no. 7, pp. 1025-1047.

26. Sobolev A.F. Determination of impedance of liners on installation "Interferometer with the flow". *Trudy pervoy Vserossiyskoy konferentsii po akustike*. Moscow, 06-09 October 2014.

27. Sobolev A.F., Ipatov M.S., Ostroumov M.N. Research on the experimental setup "Interferometer with the flow". *Materialy tret'ey otkrytoy Vserossiyskoy konferentsii po aeroakustike*. 30 September – 4 October 2013, Moscow, pp. 81-83.

28. Sobolev A.F. An increase in the efficiency of noise control in a lined duct with an airstream. *Acoustical Physics*, 1999, vol. 45, no. 3, pp. 357-365.

Об авторах

Соболев Анатолий Федорович (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник акустического отделения (НАО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru); ведущий научный сотрудник лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

Остриков Николай Николаевич (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, начальник отдела акустического отделения (НАО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru); ведущий научный сотрудник лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

Аношкин Александр Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: anoshkin@pstu.ru).

Пальчиковский Вадим Вадимович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: vvpal@bk.ru).

Бурдаков Руслан Вячеславович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», младший научный сотрудник лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: ruslan.burdakof@yandex.ru).

Ипатов Максим Сергеевич (Москва, Россия) – инженер 2-й категории акустического отделения (НАО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: zpknio9@mail.ru).

Остроумов Максим Николаевич (Москва, Россия) – инженер 2-й категории акустического отделения (НАО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: zpknio9@mail.ru).

Яковец Михаил Александрович (Москва, Россия) – инженер акустического отделения (НАО-9) Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н.Е. Жуковского (105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru).

About the authors

Anatoliy F. Sobolev (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Acoustic Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru); Leading Researcher, Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Nikolay N. Ostrikov (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Head of Unit in Acoustic Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru); Leading Researcher, Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Aleksandr N. Anoshkin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of the Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: anoshkin@pstu.ru).

Vadim V. Palchikovskiy (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vvpal@bk.ru).

Ruslan V. Burdakov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Junior Researcher, Laboratory of Noise Generation Mechanisms and Modal Analysis, Perm National Research Polytechnic University (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ruslan.burdakof@yandex.ru).

Maksim S. Ipatov (Moscow, Russian Federation) – Engineer, Acoustic Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: zpknio9@mail.ru).

Maksim N. Ostroumov (Moscow, Russian Federation) – Engineer, Acoustic Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: zpknio9@mail.ru).

Mikhail A. Yakovets (Moscow, Russian Federation) – Engineer, Acoustic Department, Central Aerohydrodynamic Institute (17, Radio st., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: aeroacoustics@tsagi.ru).

Получено 20.04.2016